

ШУНГИТ

КАК СЫРЬЕ
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ
ОГНЕУПОРНЫХ И ТУГОПЛАВКИХ
МАТЕРИАЛОВ

УДК 621.793

Одним из важнейших вопросов современного материаловедения является создание керамических огнеупорных и тугоплавких материалов, отличающихся высокими физико-механическими и прочностными характеристиками, устойчивых к высоким тепловым нагрузкам и агрессивным средам.

Особенно актуальна эта проблема в металлургической и химической промышленности, энергетическом машиностроении, строительной индустрии, нефтеперерабатывающей промышленности и других областях, где необходимо обеспечить длительный ресурс работы футеровок высокотемпературных тепловых агрегатов (печей, ванн, котлов, реакторов, ковшей, тиглей и т.д.). Эту функцию способны выполнить керамика на основе оксида алюминия и тугоплавкие бескислородные материалы, в частности керамика на основе карбидов. Первая обладает высокой механической прочностью, химической стойкостью, высокой огнеупорностью, вторая имеет сравнительно высокую электро-

теплопроводность, термостойкость и стойкость к абразивному воздействию, не смачивается расплавами цветных металлов, обладает высокой механической прочностью в холодном и нагретом состоянии, стойка в кислых шлаках [1]. В основе традиционных технологий изготовления этих материалов лежат процессы медленного протекания химических реакций при высоких температурах ($>2000\text{ }^{\circ}\text{C}$). Отличительной особенностью существующих способов является высокая энергоемкость производства, большая длительность, многооперационность и трудоемкость получения продукции [2].

Производство изделий в Республике Беларусь из карбидсодержащих материалов отсутствует, несмотря на потребность. В то же время существуют технологии, позволяющие получать их при довольно низких энергетических затратах. Наиболее перспективным в данном плане является самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС). Сущность этого процесса заключается в самопроизвольном распространении зоны химической реакции в средах, способных к выделению химической энергии с образованием ценных

конденсированных продуктов. СВС сопровождается саморазогревом продуктов (обычно на $1500\text{--}3500\text{ }^{\circ}\text{C}$ и более) и возникает при локальном воздействии на систему коротким тепловым импульсом. В дальнейшем протекает в виде волны горения без подвода энергии извне за счет собственного тепловыделения, причем СВС может реализовываться в порошковых смесях разнообразной химической природы [2].

Разработки по этому направлению ведутся в основном в рамках синтеза чистых карбидов кремния и титана. Промышленно с использованием технологии СВС изготавливают только карбид титана. Получение композиционных материалов системы карбид кремния – корунд представлено в ряде работ российских и корейских ученых. Однако в целом это направление недостаточно развито, и поэтому изучение процессов формирования материалов на основе фаз карбидов и оксикарбидов представляет большой научный и практический интерес. Освоение СВС-технологии позволило бы обеспечить отечественную промышленность различными видами тугоплавких карбидсодержащих материалов, а также в некоторой степени

решить проблему, связанную с дефицитом собственных энерго-ресурсов.

Представляется перспективным использовать при этом новый в мировой практике вид минерального сырья – шунгит. Это природный композит, в структуре которого дисперсные кристаллические силикатные частицы размером 0,5–5 мкм равномерно распределены в углеродной матрице [3]. Поскольку в этом уникальном минерале содержится значительное количество кварца и углерода, они могут экзотермически реагировать между собой при нагреве.

Шунгитовые породы, содержащие углеродное вещество определенной, присущей им структуры, так называемый шунгитовый углерод, обнаружены только в Карелии, в месторождении Зажогинском, – это продукт извержения вулканом органосиликатного геля, возраст которого около 2 млрд лет. За это время произошли химические и структурные преобразования геля, превратившие его в современную шунгитовую породу. Генезис месторождения определяет такие важные для технологии характеристики, как стабильность состава в пределах месторождения с утвержденными запасами – 35 млн т. Производственная мощность предприятия по добыче и переработке шунгита – 200 тыс. т в год [4].

По содержанию шунгитового углерода они изменяются от долей процента до 80%. Считая эту характеристику одной из основных, шунгитовые породы классифицируются на следующие разновидности: шунгит I – 98% С (стеклоуглерод), шунгит II (новые разработки) – 60% С, шунгит III – 28–35% С, шунгит IV – 3,5% С (шунгитовые сланцы) [5].

Наиболее изучены породы III разновидности, состоящие на 30% из глобулярного, рентгеноаморфного и метастабильного шунгитового углерода и на 70% – из высокодисперсных силикатных частиц. Шунгитовый углерод по рентгеновским характеристикам представляет собой некристалли-



Вадим Саранцев, научный сотрудник НИЛ «Новые материалы и технологии» Института повышения квалификации и переподготовки кадров по новым направлениям развития техники, технологии и экономики БНТУ, кандидат технических наук, доцент



Борис Хина, главный научный сотрудник Физико-технического института НАН Беларуси, доктор физико-математических наук



Елена Какошко, доцент кафедры технологии важнейших отраслей промышленности БГУ, кандидат технических наук

№ состава для ТМ	Соотношение шунгита и алюминия	Молекулярный состав
1	90% шунгита + 10% Al	10% Al + 51,3% SiO ₂ + 26,1% C + 0,18% TiO ₂ + 3,6% Al ₂ O ₃ + 2,25% FeO + 1,08% MgO + 0,27% CaO + 0,18% Na ₂ O + 1,35% K ₂ O + 1,08% S + 3,78% H ₂ O
2	85% шунгита + 15% Al	15% Al + 48,45% SiO ₂ + 24,65% C + 0,17% TiO ₂ + 3,4% Al ₂ O ₃ + 2,125% FeO + 1,02% MgO + 0,255% CaO + 0,17% Na ₂ O + 1,275% K ₂ O + 1,02% S + 3,57% H ₂ O
3	80% шунгита + 20% Al	20% Al + 45,6% SiO ₂ + 23,2% C + 0,16% TiO ₂ + 3,2% Al ₂ O ₃ + 2,0% FeO + 0,96% MgO + 0,24% CaO + 0,16% Na ₂ O + 1,2% K ₂ O + 0,96% S + 3,36% H ₂ O
4	75% шунгита + 25% Al	25,0% Al + 42,75% SiO ₂ + 21,75% C + 0,15% TiO ₂ + 3,0% Al ₂ O ₃ + 1,875% FeO + 0,9% MgO + 0,225% CaO + 0,15% Na ₂ O + 1,125% K ₂ O + 0,9% S + 3,15% H ₂ O
5	70% шунгита + 30% Al	30% Al + 39,9% SiO ₂ + 20,3% C + 0,14% TiO ₂ + 2,8% Al ₂ O ₃ + 1,75% FeO + 0,84% MgO + 0,21% CaO + 0,14% Na ₂ O + 1,05% K ₂ O + 0,84% S + 2,94% H ₂ O

Таблица. Исходные составы реакционных смесей для СВС

ческую форму углерода с графитоподобной структурой. Вместе с тем в шунгите отсутствует строго регулярная графитовая структура. По сравнению с графитовым монослоем поликонденсированная ароматическая сетка шунгита дефектна, сильно деформирована и характеризуется увеличенными межатомными расстояниями. По данным электронной микроскопии высокого разрешения, графитоподобные слои углерода длиной 4–6 нм заблокированы в пачки с количеством слоев от 3 до 8. Пачки создают глобулярные образования размером 10–20 нм с луковичной структурой, которые определяются как фуллереноподобные [6].

Зажогинский шунгит признан мировым сообществом новым углеродистым сырьем, представляющим интерес для ряда областей промышленности. Вследствие весьма развитой поверхности контакта между активным углеродом и силикатами в шунгитовой породе при нагреве активно протекают реакции восстановления кремнезема до металлического кремния $\text{SiO}_2 + 2\text{C} \rightarrow \text{Si} + 2\text{CO}$ и образования карбида кремния $\text{SiO}_2 + 3\text{C} \rightarrow \text{SiC} + 2\text{CO}$. Эти реакции осуществляются с меньшими внешними энергозатратами, чем в традиционной шихте на основе кремнезема и кокса, применяемой для синтеза SiC. Благодаря этому шунгитовая порода используется

в производстве литейного чугуна, ферросплавов и карбида кремния, а также при удалении жидких шлаков и выплавке элементарного фосфора [6].

При определенных условиях интенсивное протекание гетерогенных реакций в шунгитовых породах из-за большой площади контакта между углеродом (элементом-восстановителем) и минеральными компонентами (оксидами) [7] можно реализовать в режиме СВС.

В связи с изложенным целью настоящей работы явилось исследование возможности получения новых композиционных огнеупорных и тугоплавких материалов в системе Al–SiO₂–C с использованием ресурсо- и энергоэффективного метода СВС. Для этого в качестве основного сырьевого компонента применяли шунгитовую породу III Зажогинского месторождения с содержанием углерода 28–35% (здесь и далее по тексту, если не оговорено особо, приведены массовые проценты). Для приготовления порошковых смесей использовался молотый шунгит с удельной поверхностью 100 см²/г, имеющий следующий усредненный химический состав: 57% SiO₂, 29% C, 0,2% TiO₂, 4% Al₂O₃, 2,5% FeO, 1,2% MgO, 0,3% CaO, 0,2% Na₂O, 1,5% K₂O, 1,2% S и 4,2% H₂O (связанная вода в кристаллической решетке минералов). Для более полного восстановления

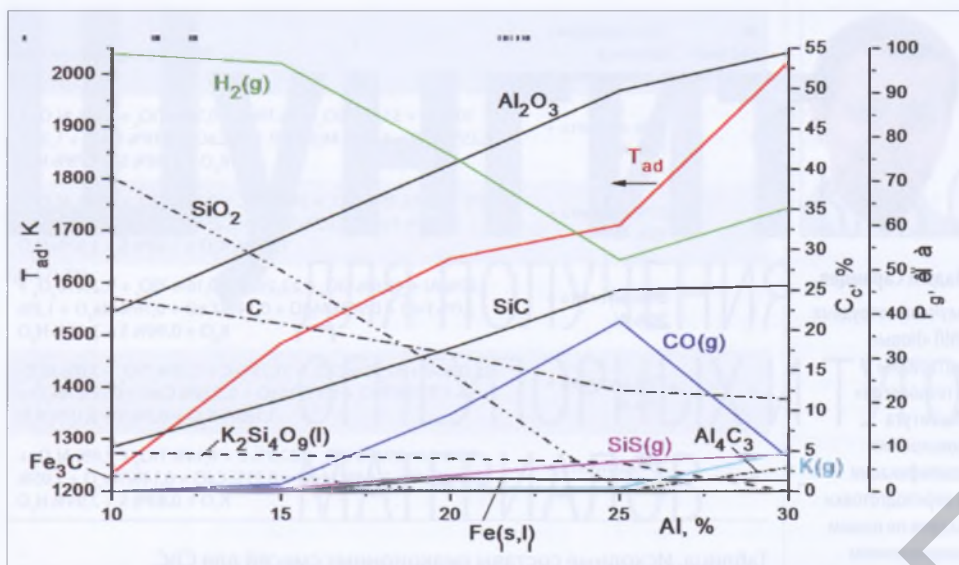


Рис. 1. Адиабатическая температура взаимодействия T_{ad} , K, равновесные составы конденсированных фаз (SiO_2 , Al_2O_3 , C, SiC, Al_4C_3 , $\text{K}_2\text{Si}_4\text{O}_9$) C_i , % и парциальные давления основных компонентов газовой фазы (H_2 , CO, SiS) $P_{g,i}$, кПа, при T_{ad} при алюминотермическом восстановлении шунгита; s – твердое состояние, l – жидкое, g – газообразное, c – конденсированные фазы (твердые и жидкие)

оксидов, входящих в шунгит, в состав шихты вводили порошок алюминия в виде пудры алюминиевой ПАП-2 (ГОСТ 5494-95) с остатком 0,3% на сите 0056.

Составы порошковых смесей для исследований выбраны таким образом, чтобы обеспечить достаточно высокую степень восстановления оксидов и получение тугоплавких соединений с целью достижения требуемых характеристик конечного материала: 70–90% шунгита и 10–30% алюминия. Исходные составы реакционных смесей приведены в таблице.

Для оценки возможного механизма взаимодействия при СВС в указанных составах и определения адиабатической температуры взаимодействия T_{ad} , равновесного состава продуктов СВС при T_{ad} и его эволюции во время остывания после синтеза использовали термодинамическое моделирование (ТМ). Для ТМ применена компьютерная программа Terra (разработка МГТУ им. Баумана, новая версия программы АСТРА-4 [7]), расчеты по которой проводили по разработанной ранее методике [8] в адиабатическом (изобарно-изотермическом) режиме при атмосферном давлении для моделирования взаимодействия

во время СВС и в изобарно-изотермическом режиме при различных температурах для анализа остывания продуктов СВС.

В ряде случаев вводили запрет на соединения, которые не могут образоваться в системе согласно известным бинарным и тройным диаграммам фазовых равновесий (например, фаза Fe_3C при температурах, превышающих ее точку плавления).

Результаты ТМ гетерогенного взаимодействия при СВС в адиабатическом режиме для всех составов показаны на рис. 1. Основными продуктами являются тугоплавкие фазы – оксид алюминия и карбид кремния SiC. С увеличением содержания металла-восстановителя (алюминия) в исходной шихте их содержание существенно возрастает, и адиабатическая температура T_{ad} увеличивается почти в два раза: от 1233 K при 10% Al до 2024 K при 30% Al. При этом в составе равновесных продуктов остается значительное количество непрореагировавшего углерода – от 24% C при 10% Al в шихте до 11,5% C при 30% Al. Среди конденсированных продуктов, по данным ТМ, имеется небольшое количество расплавленного соединения

$\text{K}_2\text{Si}_4\text{O}_9$ (его температура плавления T_m составляет 1043 K). Газовая фаза состоит в основном из водорода и монооксида углерода, а также небольшого количества SiS. Изменение хода зависимостей равновесных концентраций H_2 и CO от содержания алюминия в шихте при 25% Al, а также изгиб на линиях T_{ad} и концентрации SiC связаны с тем, что при этом в составе продуктов исчезает диоксид кремния.

Также, по данным ТМ, при 25 и 30% Al формируется небольшое количество карбида алюминия Al_4C_3 . При $T < T_m(\text{Fe}_3\text{C}) = 1525$ K в равновесном состоянии имеется небольшое количество цементита Fe_3C (1,8%), а при более высоких адиабатических температурах – около 1,5% восстановленного железа (твердого при $T < T_m(\text{Fe}) = 1809$ K и жидкого при $T > T_m(\text{Fe})$). Как правило, при СВС гетерогенное взаимодействие происходит после образования достаточного количества расплава на основе одного из реагентов, обычно металлического (в данном случае – алюминия). Результаты ТМ данной системы в адиабатическом режиме свидетельствуют о том, что при низком содержании металла-восстановителя (алюминия) величина T_{ad} ненамного превышает точку плавления алюминия ($T_m(\text{Al}) = 933$ K), то есть в реальных условиях (при наличии теплотерь) для инициирования СВС в этих составах необходим подогрев шихты.

Во всех рассмотренных составах после остывания от температуры СВС в равновесном состоянии присутствуют следующие твердые фазы: Al_2O_3 , SiC, SiO_2 и остаточный углерод, а также небольшое количество цементита. Содержание карбида кремния и углерода при охлаждении изменяется незначительно по сравнению с состоянием при адиабатической температуре СВС, а доля оксида алюминия остается неизменной.

Поскольку СВС обычно осуществляют в воздушной среде, где возможно окисление остаточного углерода кислородом воздуха, было выполнено ТМ при

варьировании содержания газообразного кислорода в системе. Зависимость адиабатической температуры горения без учета ($T_{ad,1}$) и с учетом взаимодействия с кислородом в количестве, необходимом для полного выгорания углерода ($T_{ad,2}$), представлена на рис. 2. Показано также исходное содержание углерода (C_{init}) в смесях составов №1–5, концентрация непрореагировавшего углерода при ТМ без свободного кислорода (C_{resid}) и необходимое количество кислорода.

Как видно из представленных на рис. 3 данных, при полном окислении углерода адиабатическая температура горения $T_{ad,2}$ для составов №1, 2 и 3 (10, 15 и 20% Al соответственно) почти одинакова – около 1800 К. Для состава №4 (25% Al) без взаимодействия с кислородом адиабатическая температура $T_{ad,1}$ оказывается лишь на 90 К ниже, чем в составах №1–3 при полном окислении углерода, а величина $T_{ad,2}$ почти на 250 К превышает значение $T_{ad,1}$. В составе №5 (30% Al) повышение температуры при полном выгорании углерода составляет $T_{ad,2} - T_{ad,1} = 210$ К, однако для смеси этого состава адиабатическая температура достаточно высока и без взаимодействия с кислородом – $T_{ad,1} = 2024$ К. Следовательно, роль окисления имеющегося в шунгите углерода кислородом воздуха становится наиболее существенной при понижении содержания алюминия в шихте.

Исходя из результатов ТМ, для дальнейших исследований выбраны составы 1, 3 и 5 реак-

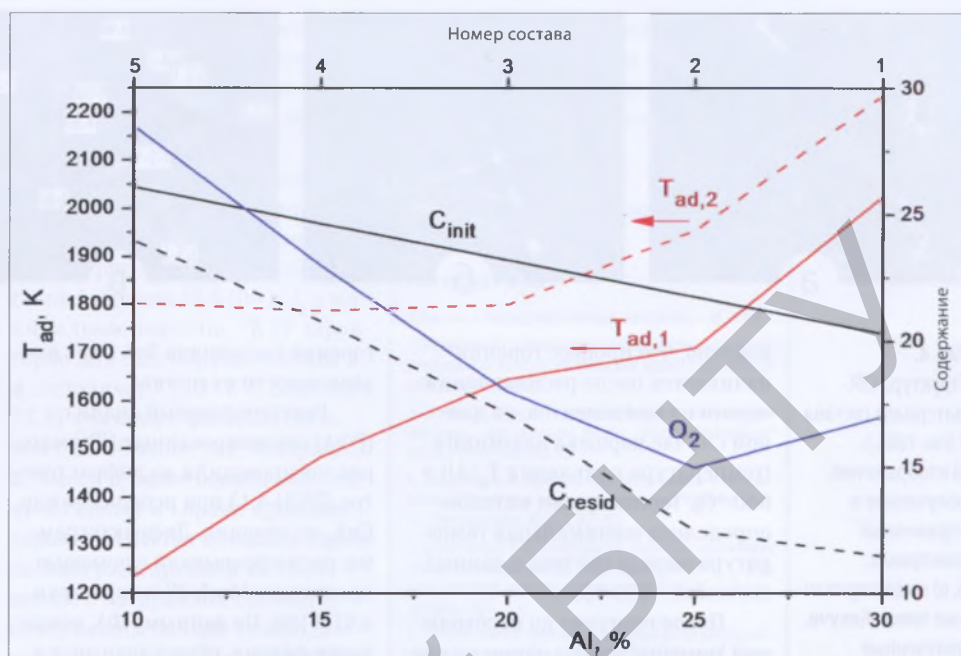


Рис. 2. Адиабатическая температура горения в составах №1–5 без участия кислорода воздуха ($T_{ad,1}$) и с учетом кислорода, необходимого для полного выгорания углерода ($T_{ad,2}$): C_{init} – исходное содержание углерода, C_{resid} – остаточное содержание углерода при ТМ без учета взаимодействия с кислородом воздуха, O_2 – количество кислорода, необходимое для полного окисления углерода

ционных смесей для СВС (табл.). Порошковую шихту для СВС готовили путем смешения исходных компонентов в сухом виде до получения однородной смеси, которую затем просеивали через сито с размером ячейки 0,5 мм для повышения однородности. Формование образцов из порошковых смесей осуществляли методами осевого (для получения цилиндрических образцов круглого сечения) и радиального прессования (для получения брусков прямоугольного и квадратного сечения) на гидравлическом прессе при давлении 50–200 МПа.

Прессовки высушивали в сушильном шкафу при 120 °С до полного удаления влаги, при этом температуру медленно поднимали от комнатной до 120 °С.

Для проведения СВС-процесса высушенные образцы устанавливали в холодную печь и нагревали до температуры 300 °С, при которой окисление алюминия не происходит, со скоростью 4–5 С/мин, после чего их переносили в другую печь с температурой 800–900 °С, которая была достаточной для инициирования СВС. В теории и практике СВС-процессов уста-

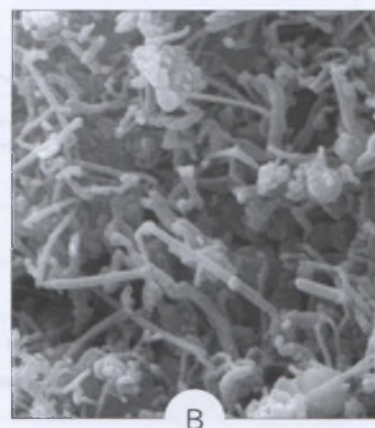
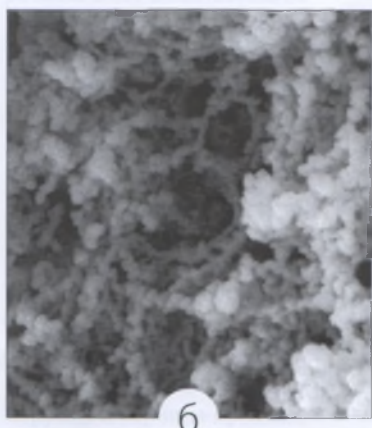
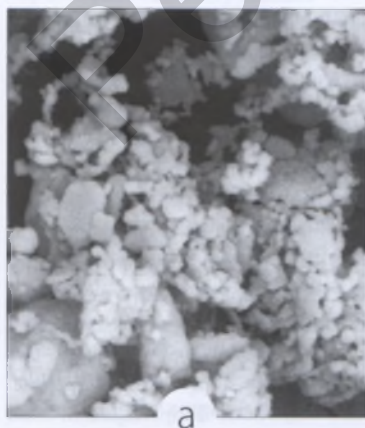


Рис. 3. Электронно-микроскопические изображения структуры СВС-образцов (масштаб 1 мкм) составов: а) 1, б) 3, в) 5

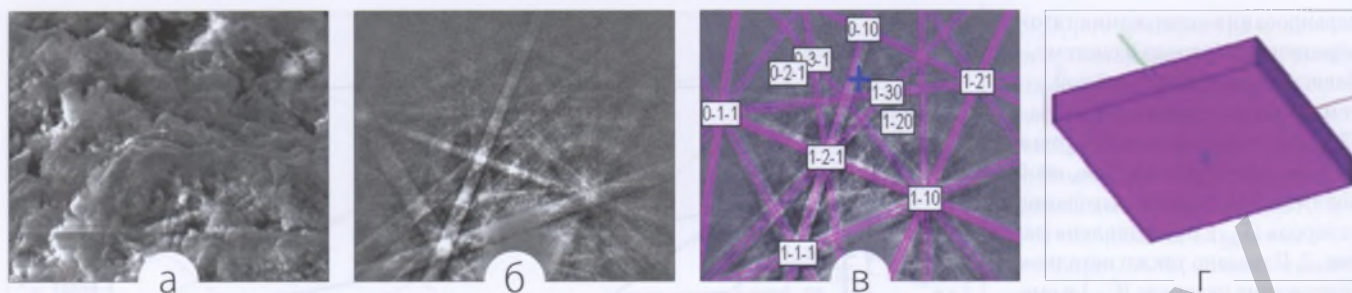


Рис. 4. Структура СВС-материала состава 3 (см. табл.): а) изображение, полученное в отраженных электронах; б, в) индексированные линии Кикучи, полученные при дифракции отраженных электронов; г) изображение элементарной ячейки фуллерита

новлено, что процесс горения начинается после расплавления одного из компонентов – в данном случае порошка алюминия (температура плавления $T_m(\text{Al}) = 660^\circ\text{C}$). Термопарным методом определена минимальная температура начала синтеза в данных системах – 700°C .

После прогрева до необходимой температуры на одном из краев (или углов) образца происходит самопроизвольное инициирование экзотермической реакции, которая далее распространялась по образцу в виде двух последовательных волн (два фронта горения). При прохождении второй волны образец разогревался до ярко-белого цвета.

Скорость СВС измеряли по времени прохождения волны горения по образцу от момента начала реагирования (то есть визуально заметного резкого повышения температуры на одном из краев образца) до его завершения – достижения волной горения другого края. Время прогрева образца до воспламенения определялось температурой печи, а скорость

горения составляла 3–5 мм/с в зависимости от состава.

Рентгенофазовый анализ (РФА) синтезированных СВС-материалов проводили на дифрактометре ДРОН-4.13 при использовании $\text{CuK}\alpha$ -излучения. Дифрактограммы расшифровывали с помощью программы Mach [9] и картотеки ASTM [10]. По данным РФА, основными фазами, образующимися в системе «шунгит – алюминий», являются: корунд ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), карбид кремния (SiC) и кристобалит, а также имеются свободный кремний, алюминий и гематит.

Морфологию поверхности и микроструктуру поперечного сечения синтезированных материалов анализировали с помощью сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения «Mira» фирмы Tescan (Чехия). Методом анализа дифракционных картин обратно рассеянных электронов (EBSD) с использованием линий Кикучи [11] проводили точечный микрорентгеноспектральный анализ, съемку кривых распределения концентраций по отдельным направлениям и

съемку в характеристическом рентгеновском излучении. На экране цветного дисплея получали картину распределения исследуемого элемента. Концентрация элемента определялась плотностью цвета.

Синтезированные материалы из порошковых смесей 1, 3 и 5 имеют неравномерно-пористую структуру с размерами пор 100–300 мкм, при этом поры имеют вытянутую форму (рис. 3). Размеры зерен меняются в широких пределах – от 1–2 до 30–50 мкм и зависят от исходного состава шихты.

Микроструктура СВС-образца из смеси 1 (табл.) представлена в основном зернами кварца и спекшимися мелкими кристаллами алюминия, количество которого в исходной порошковой смеси было минимальным – 10% (рис. 3а).

В структуре СВС-материала из смеси 3 имеются участки, содержащие агрегаты-цепочки толщиной 1–2 мкм, длина которых варьируется от 3–5 звеньев до нескольких десятков (рис. 3б). Фрагменты цепочек переплетаются, образуя сложные пространственные структуры. Вероятными причинами такого поведения может служить природа фуллереноподобных глобул углерода в шунгите, которые структурируются под влиянием высокой температуры и контакта с расплавом, образовавшимся в волне СВС. Диаметр «ячеек», образованных такими цепочками, составляет 10–20 мкм. В образце также имеются участки из мелких зерен, слипшихся при кристаллизации и остывании продуктов СВС вследствие высокой адгезии между мелкими частицами. Присутствие в материале непрореа-

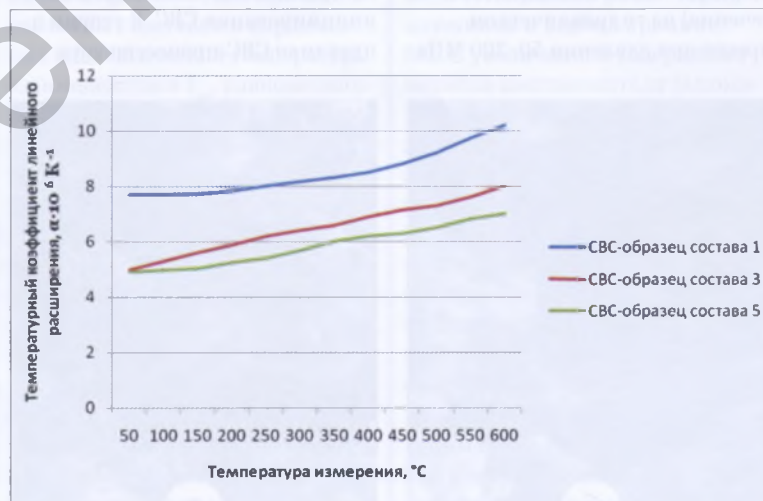


Рис. 5. Зависимость ТКЛР синтезированных материалов от температуры для составов 1, 3 и 5

гировавшего углерода шунгита в волне СВС в виде фуллерита подтверждается результатами точечного микрорентгеноспектрального анализа (рис. 4).

В структуре СВС-материала из смеси 5 имеются участки (рис. 3в), содержащие микроскопические нитевидные кристаллы в виде сплошных стрежней, которые, вероятно, сформировались при СВС по механизму «газ – жидкость – кристалл» [1]. Их диаметр составляет менее 1 мкм, а длина достигает 10–20 мкм. Скорее всего, эти нитевидные кристаллы представляют собой фазу SiC, что подтверждается наличием этого соединения в СВС-материале по данным РФА. Корунд распределен в виде зерен и их агрегатов различной формы размером 10–30 мкм.

Таким образом, из представленных электронно-микроскопических изображений видно, что на формирование структуры синтезированных материалов влияет главным образом количественное соотношение шунгита и алюминия в шихте. Наличие в порошковой шихте 70% шунгита и до 30% алюминия обуславливает образование при СВС тугоплавких соединений – корунда и карбида кремния, которые обладают высокой твердостью и химической стабильностью в окислительных средах при повышенных температурах, что обеспечивает такое сочетание физико-химических и механических свойств, которое необходимо для огнеупорных и тугоплавких материалов.

По данным испытаний, характеристики полученных СВС-материалов находятся в следующих интервалах: плотность 1750–2280 кг/м³, пористость (открытая) 25–38%, предел прочности при сжатии 40–90 МПа, теплопроводность 0,78–0,86 Вт/(м К) при 20–400 °С.

Температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) образцов в виде брусков размером 5х5х50 мм определяли на электронном dilatометре «DIL 402PC» фирмы NETSCH (Германия) в интервале температур 20–1000 °С.

Значения ТКЛР синтезированных материалов, измеренные в интервале температур 20–600 °С для различных составов, приведены на рис. 5.

Максимальное значение ТКЛР опытных образцов при конечной температуре измерения характерно для СВС-образца состава 1 и равно $10,3 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹, а минимальное значение ТКЛР характерно для СВС-образца состава 5 и составляет $7,1 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹. Значения ТКЛР связаны с фазовым составом СВС-образца. Так, материалы из смеси 5, включающие корунд, кристоболит и карбид кремния, характеризуются меньшим термическим расширением по сравнению с материалом состава 1, содержащим больше углерода и меньше алюминия (рис. 5). ТКЛР синтезированного материала из смеси 5 при температуре измерения 400 °С имеет промежуточное значение, $\alpha = 6,0 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹, между соответствующими показателями для корундовой ($\alpha = 8,5 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹) и карбидокремневой ($\alpha = 5,2 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹) керамики. Следовательно, полученный СВС-материал может быть использован в различных областях (металлургической, химической и нефтеперерабатывающей промышленности, энергетическом машиностроении, строительной индустрии и др.) в качестве конструкционного материала для изделий, работающих при высоких температурах и в агрессивных средах, для футеровки высокотемпературных печей и индукторов.

В результате проведенных исследований определена возможность использования шунгитовой породы для получения огнеупорных и тугоплавких материалов на основе системы Al–SiO₂–C методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Установлено, что наличие в порошковой смеси 70% шунгита Зажогинского месторождения в качестве источника углерода и восстанавливаемых оксидов и не менее 30% порошка алюминия как восстановителя обуславливает образование корунда и карбида кремния

при СВС в данной системе, что придает полученным материалам комплекс повышенных физико-химических и механических свойств. ■

Статья поступила в редакцию 03.12.2012 г.

Литература

1. Гнесин Г.Г. Карбидокремниевые материалы. – М., 1977.
2. Мержанов А.Г. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез // Сб. «Физическая химия. Современные проблемы». – М., 1983.
3. Мосин О.В. Шунгит – природный нанотехнологический материал. Электронный ресурс: <http://publinfo.ru/articles/folder-nano/list-30>.
4. Филиппов М.М. Шунгиты Карелии: термины и определения // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 4. – Петрозаводск, 2001. С. 82–90.
5. Ковалевский В.В. Углеродистое вещество шунгитовых пород: структура, генезис, классификация. Дисс. ... д-ра геол.-минерал. наук по специальности 25.00.05. – Петрозаводск, 2007.
6. Ковалевский В.В. Шунгит – природный фуллереноподобный углерод: структура, свойства, модификация, новые направления использования // Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах / Под ред. П.А. Вятя и др. – Мн., 2011. С. 74–79.
7. Ватолин Н.А. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах / Н.А. Ватолин, Г.К. Моисеев, Б.Г. Трусов. – М., 1994.
8. Хина Б.Б. Моделирование восстановления железной окислы продуктами конверсии метана в плазменной струе. I. Термодинамическое моделирование / Б.Б. Хина, П.С. Гринчук // Инженерно-физический журнал. 2011. Т. 84, № 2. С. 263–269.
9. Match. Phase Identification from Powder Diffraction URL. Электронный ресурс: <http://www.crystalimpact.com/match/>.
10. Powder Diffraction File (PDF) of the International Center for Diffraction Data. – Philadelphia, 1996.
11. Engler O. Introduction to texture analysis macrotexture, microtexture, and operation mapping / O. Engler, V. Randle. – CRC Press, 2010.

Summary

The results of research on estimating the possibility of the use of schungite rock for producing heat resistant and refractory ceramic materials on the basis of system Al–SiO₂–C by self-propagating high-temperature synthesis (SHS) are presented. It is established that SHS in powder mixtures containing 70% schungite of the Zazhoginsky deposit and about 30% Al results in the formation of corundum and silicon carbide in the given system, which imparts a complex of high physical, chemical and mechanical properties to the synthesized material. The produced composite material can be used for a variety of applications in metallurgical and chemical industry, power machine building, construction industry, oil-processing industry, etc. as a structural material for articles working at high temperatures and in hostile environment and as lining for high-temperature furnaces and induction heaters.